

In the name of Allah, the Most Gracious, the Most Merciful



### Copyright disclaimer

"La faculté" is a website that collects medical documents written by Algerian assistant professors, professors or any other health practicals and teachers from the same field.

Some articles are subject to the author's copyrights.

Our team does not own copyrights for some content we publish.

"La faculté" team tries to get a permission to publish any content; however , we are not able to contact all authors.

If you are the author or copyrights owner of any kind of content on our website, please contact us on: [facadm16@gmail.com](mailto:facadm16@gmail.com) to settle the situation.

All users must know that "La faculté" team cannot be responsible anyway of any violation of the authors' copyrights.

Any lucrative use without permission of the copyrights' owner may expose the user to legal follow-up.



# Module de Biophysique

## Ondes sonores et ultrasonores

[acoustique physique – ultrasons et applications médicales – biophysique de l'audition]

# Ondes sonores et ultrasonores

Acoustique physique – ultrasons et applications médicales

Pr. M. CHEREF

Centre Maherzi

Faculté de Médecine – Université d'Alger

# UTILISATION DES ULTRASONS

THÉRAPEUTIQUE

EFFETS THERMIQUES ET MÉCANIQUES

DIAGNOSTIC

ÉCHOGRAPHIE

HISTORIQUEMENT

D'ABORD EN THÉRAPEUTIQUE

1<sup>ÈRE</sup> ACTION EN DIAGNOSTIC  
(1942)

# IMAGERIE ULTRASONORE

INCONTOURNABLE  
DANS LE CADRE DU DIAGNOSTIC

NÉCESSITÉ DE BIEN APPRÉHENDER  
LA BIOPHYSIQUE DES ULTRASONS

NATURE DE L'ONDE ULTRASONORE  
INTERACTIONS AVEC LES MILIEUX BIOLOGIQUES

OPTIMISATION DE L'OUTIL ÉCHOGRAPHIQUE  
NATURE ET MODE DE FONCTIONNEMENT DES MATÉRIELS  
UTILISATION EN CLINIQUE

# Le concept d'onde ?

# I- Concept d'onde (2) [du latin « unda : eau courante »]

## ➤ Définition

Phénomène résultant de la propagation dans un milieu d'une succession de signaux (ou ébranlements) émis par un système émetteur

## ➤ Types d'Ondes : origines physiques et comportements différents

- Ondes électromagnétiques
- Ondes mécaniques

## ➤ Formalisme mathématique

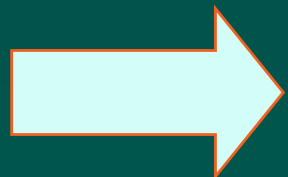
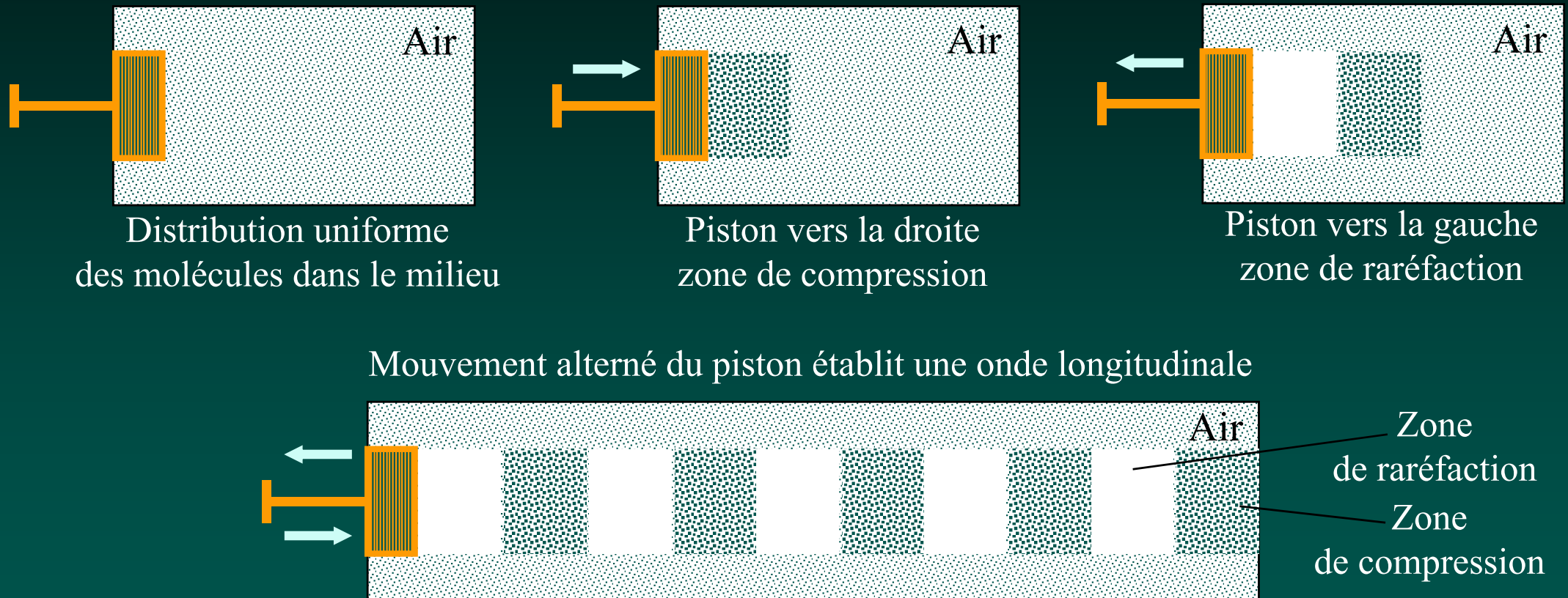
Une onde est régie par l'équation de D'Alembert

**A LA DIFFÉRENCE DE L'ONDE ELECTROMAGNÉTIQUE  
L'ONDE SONORE A BESOIN D'UN MILIEU MATÉRIEL POUR SE PROPAGER**

# Une onde sonore ?

# II- Onde sonore

## GÉNÉRATION D'UNE ONDE SONORE

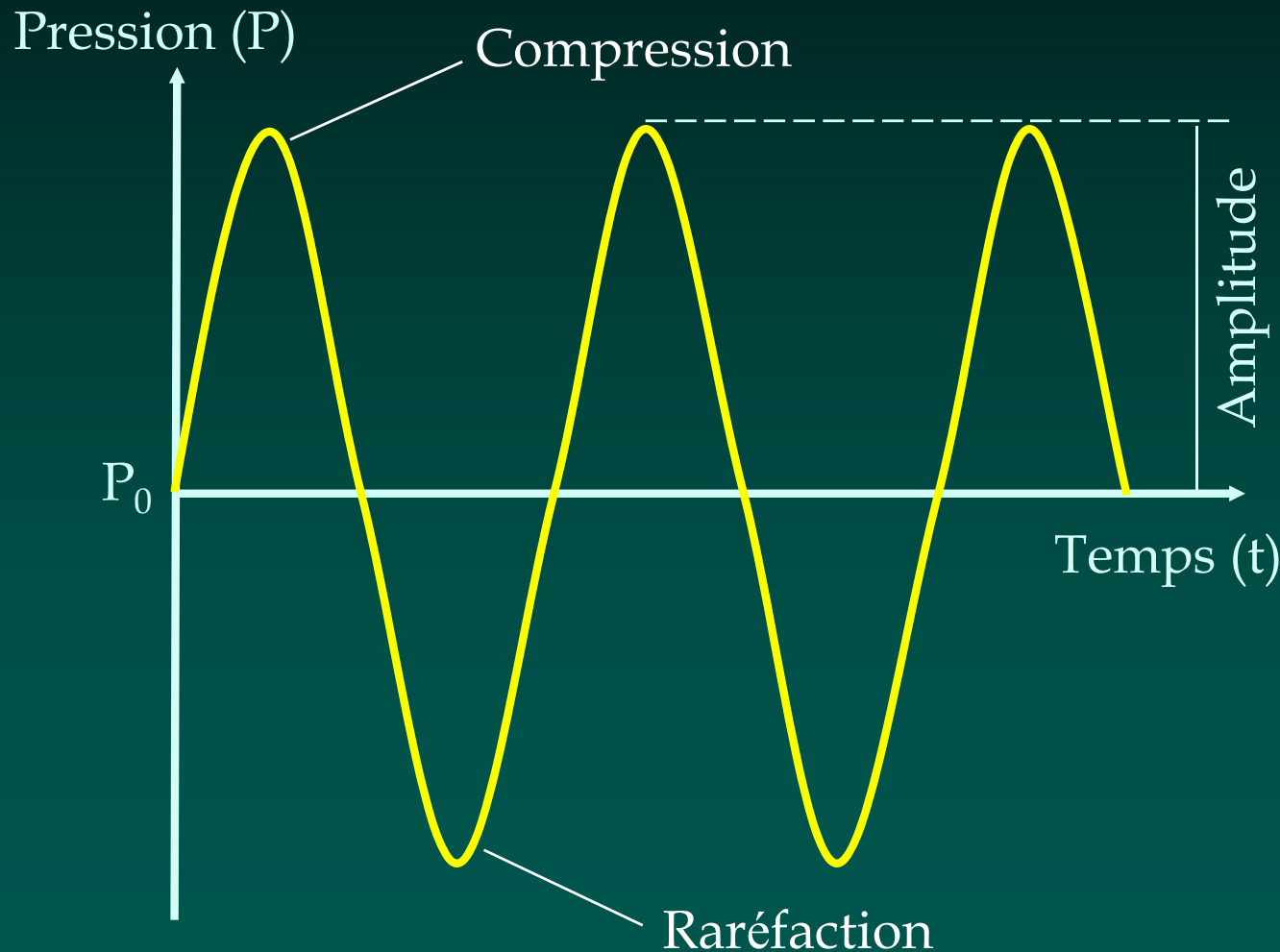


LA PROPAGATION DU SON DANS L'AIR S'EFFECTUE  
PAR LA MISE EN BRANLE SUCCESSIVE DES COUCHES D'AIR

# Caractérisation d'une onde sonore ?

# II- Onde sonore : Caractérisation (1)

## ➤ Formalisme mathématique



ÉQUATION D'ONDE

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$$

SOLUTION  
(Onde sphérique)

$$P(r, t) = P_0 \frac{1}{r} e^{-i(kr - \omega t)}$$

SOLUTION  
(Onde plane)

$$P(r, t) = P_0 e^{-i(kr - \omega t)}$$

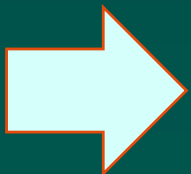
## II- Onde sonore : Caractérisation (2)

### ➤ Notion d'ondes longitudinales

VIBRATIONS SONORES



ONDES LONGITUDINALES



mouvements périodiques  
qui s'effectuent dans le sens de propagation

(exemple du ressort)

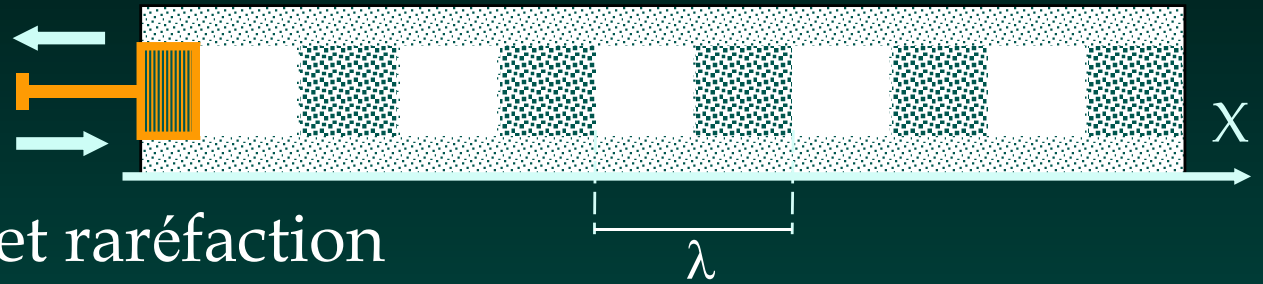
## II- Onde sonore : Caractérisation (3)

### ➤ Double périodicité (spatiale et temporelle)

#### ■ Périodicité spatiale

- La longueur d'onde  $\lambda$  :

**Distance** entre compression et raréfaction



#### ■ Périodicité temporelle

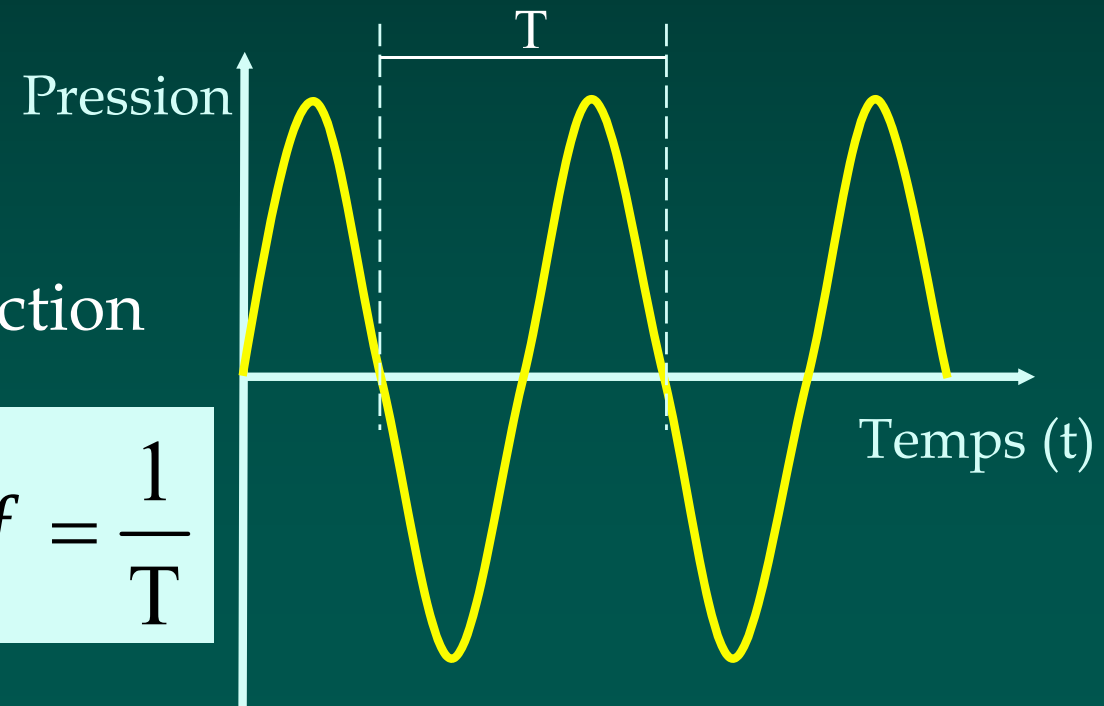
- La période  $T$  :

**Temps** entre compression et raréfaction

- La fréquence  $f$  :

**Nombre de fois** où l'onde oscille sur un cycle **chaque seconde**

$$f = \frac{1}{T}$$



## II- Onde sonore : Caractérisation (4)

### ➤ Phase $\varphi$ et Célérité $c$

#### ■ Notion de phase

- La phase  $\varphi$  :

**Retard** entre deux mouvements qui sont décalés dans le temps

#### ■ Célérité d'une onde

- La célérité  $c$  :

**Vitesse** à laquelle une onde se propage dans le milieu considéré  
( $c$  ne dépend que du milieu dans lequel l'onde se propage)

Exemple : milieu fluide

$$c = \frac{1}{\sqrt{\chi \cdot \rho}}$$

$\chi$  : coefficient de compressibilité

$E$  : module d'Young

$\rho$  : masse volumique

Exemple : milieu solide

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

## II- Onde sonore : Caractérisation (5)

### ➤ Vitesse vibratoire / célérité d'une onde

#### ■ Vitesse vibratoire

La vitesse vibratoire (ou instantanée) est la dérivée (mathématique) par rapport au temps  $t$  de la fonction  $x(t)$  qui caractérise l'onde sonore :

$$v = dx(t) / dt = d(A \sin \omega t) / dt = A \omega \cos \omega t$$

#### ■ Célérité d'une onde

le rapport de la distance entre deux points A et B vis-à-vis du temps mis par l'onde pour aller de A à B. si le milieu est isotrope, la célérité ne dépend que du milieu dans le quel se propage cette onde :

Exemple de l'air :  $c = 340 \text{ m/s}$ , de l'eau :  $1450 \text{ m/s}$

## II- Onde sonore : Caractérisation (6)

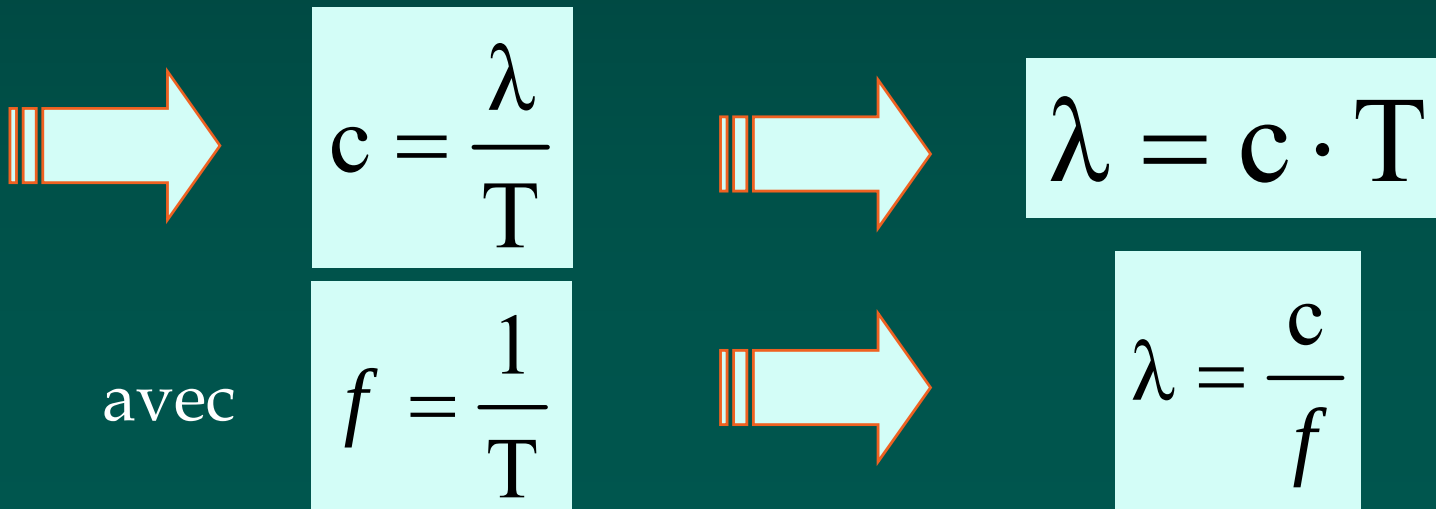
### ➤ Correspondance temporelle et spatiale

#### ▪ La longueur d'onde $\lambda$ :

- Distance entre deux points A et B dans un même état d'oscillation
- Distance parcourue (entre A et B) par l'onde en une période T

#### ▪ La célérité c :

- Vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré



avec

$$c = \frac{\lambda}{T}$$
$$f = \frac{1}{T}$$
$$\lambda = c \cdot T$$
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

## II- Onde sonore : Caractérisation (7)

➤ La longueur d'onde  $\lambda$  : Caractéristique extrinsèque de l'onde

Exemple d'une Onde sonore de fréquence  $f = 1\text{kHz}$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

ou de période  $T = 10^{-3}\text{ s}$

$$\lambda = c \cdot T$$

| Milieu      | Masse volumique $\rho$<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | Célérité $c$<br>(m/s) | Longueur d'onde $\lambda$<br>(m) |
|-------------|------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Air         | 1,2                                            | 330                   | 0,33                             |
| Eau         | 1000                                           | 1480                  | 1,48 (x 4,5)                     |
| Tissus mous | 1050                                           | 1540                  | 1,54 (x 4,66)                    |
| Os Crâne    | 1912                                           | 4080                  | 4,08 (x 12,4)                    |

$\lambda$  DÉPEND DU MILIEU DANS LEQUEL SE PROPAGE L'ONDE

## II- Onde sonore : Caractérisation (8)

### ➤ Impédance acoustique $Z$

- Grandeur particulièrement importante pour caractériser un milieu
- Dépend de la nature du milieu (masse volumique) et de la célérité de l'onde

$$Z = \rho \cdot c = \frac{P}{v}$$

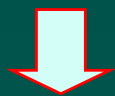
$\rho$  : masse volumique du fluide

$c$  : célérité de l'onde dans le milieu considéré

$P$  : pression acoustique

$v$  : vitesse vibratoire

**IMPÉDANCE ACOUSTIQUE  $Z$**



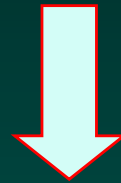
**RÉSISTANCE DES TISSUS AU PASSAGE DE L'ONDE (ULTRA)SONORE**

### Exemples d'Impédances acoustiques

| Milieu      | $Z$ (kg/m <sup>2</sup> .s) |
|-------------|----------------------------|
| Air         | 0,0004                     |
| Poumon      | 0,26                       |
| Eau         | 1,5                        |
| Tissus mous | 1,3 – 1,7                  |
| Squelette   | 3,8 – 7,4                  |

# II- Onde sonore : Pression et Intensité (1)

PROPAGATION DE L'ONDE SONORE  
DANS LE MILIEU CONSIDÉRÉ

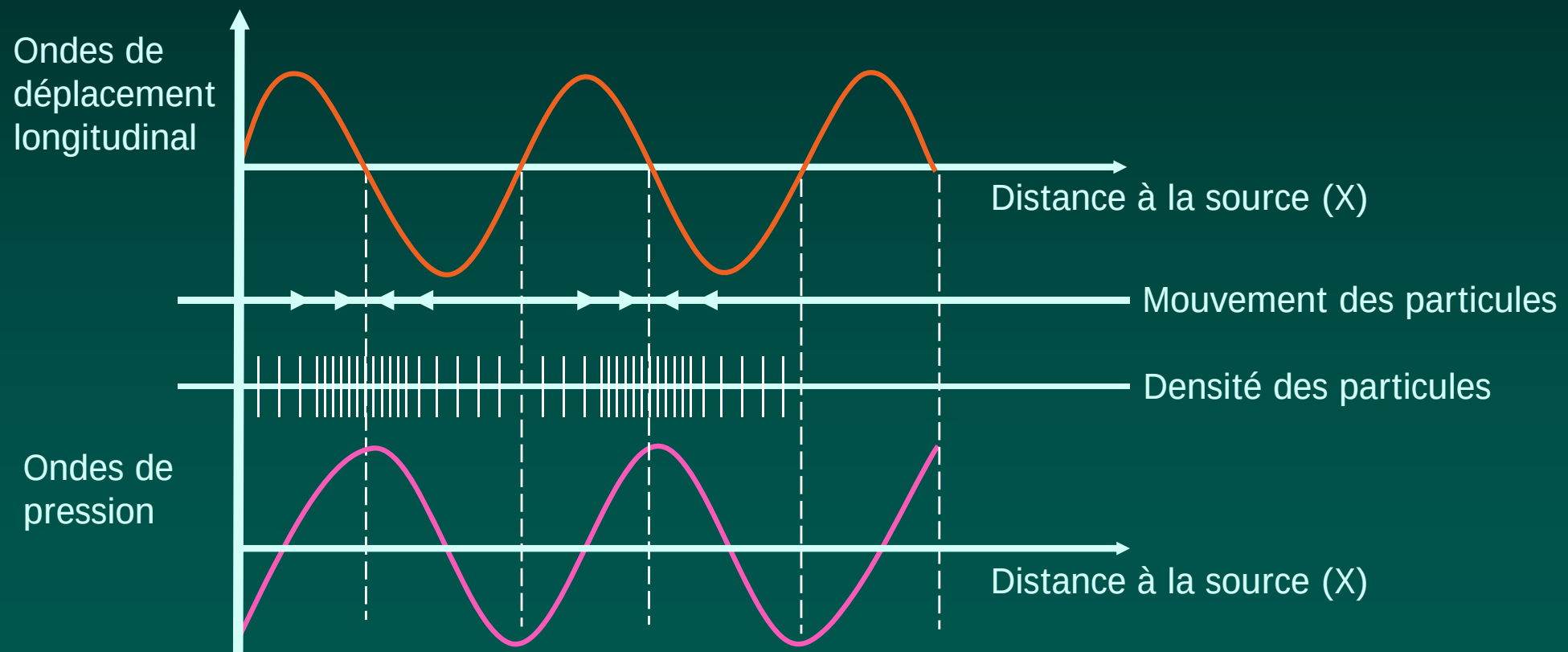


VARIATIONS DE LA PRESSION LOCALE  
ET  
TRANSPORT D'ÉNERGIE (VIBRATOIRE)

## II- Onde sonore : Pression et Intensité (2)

### ➤ Pression acoustique $P$

Exemple d'une onde sonore (son pur) dans un milieu fluide



## II- Onde sonore : Pression et Intensité (3)

### ➤ Pression acoustique P

- Traduit les variations de Pression autour de la pression  $P_0$  du milieu
- Conséquence aux phénomènes de compression et de raréfaction générés

Exemple : propagation d'une onde sonore dans un fluide

$$P = v \cdot \rho \cdot c$$

$v$  : vitesse de déplacement (vitesse vibratoire)  
 $c$  : célérité dans le milieu considéré  
 $\rho$  : masse volumique du milieu considéré

$P \# [\text{MPa}]$

+

GRANDES AMPLITUDES



PHÉNOMÈNE DE CAVITATION

## II- Onde sonore : Pression et Intensité (4)

### ➤ Puissance acoustique (1)

- Propagation de sons ou ultrasons  $\longrightarrow$  Propagation d'énergie acoustique
- Quantité d'énergie qui traverse une unité de surface dans une unité de temps

Dans le cas d'un « son pur »

$$W = v \cdot P$$

$v$  : vitesse de déplacement (vitesse vibratoire)

$P$  : Pression acoustique

- La mesure du niveau de  $W$  se fait toujours en référence à  $W_0$  ( $10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup>)

UTILISATION DU DÉCIBEL dB



$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_0}$$

## II- Onde sonore : Pression et Intensité (5)

### ➤ Puissance acoustique (2)

- La mesure du niveau de  $W$  se fait toujours en référence à  $W_0$  ( $10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup>)

UTILISATION DU DÉCIBEL dB



$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_0}$$



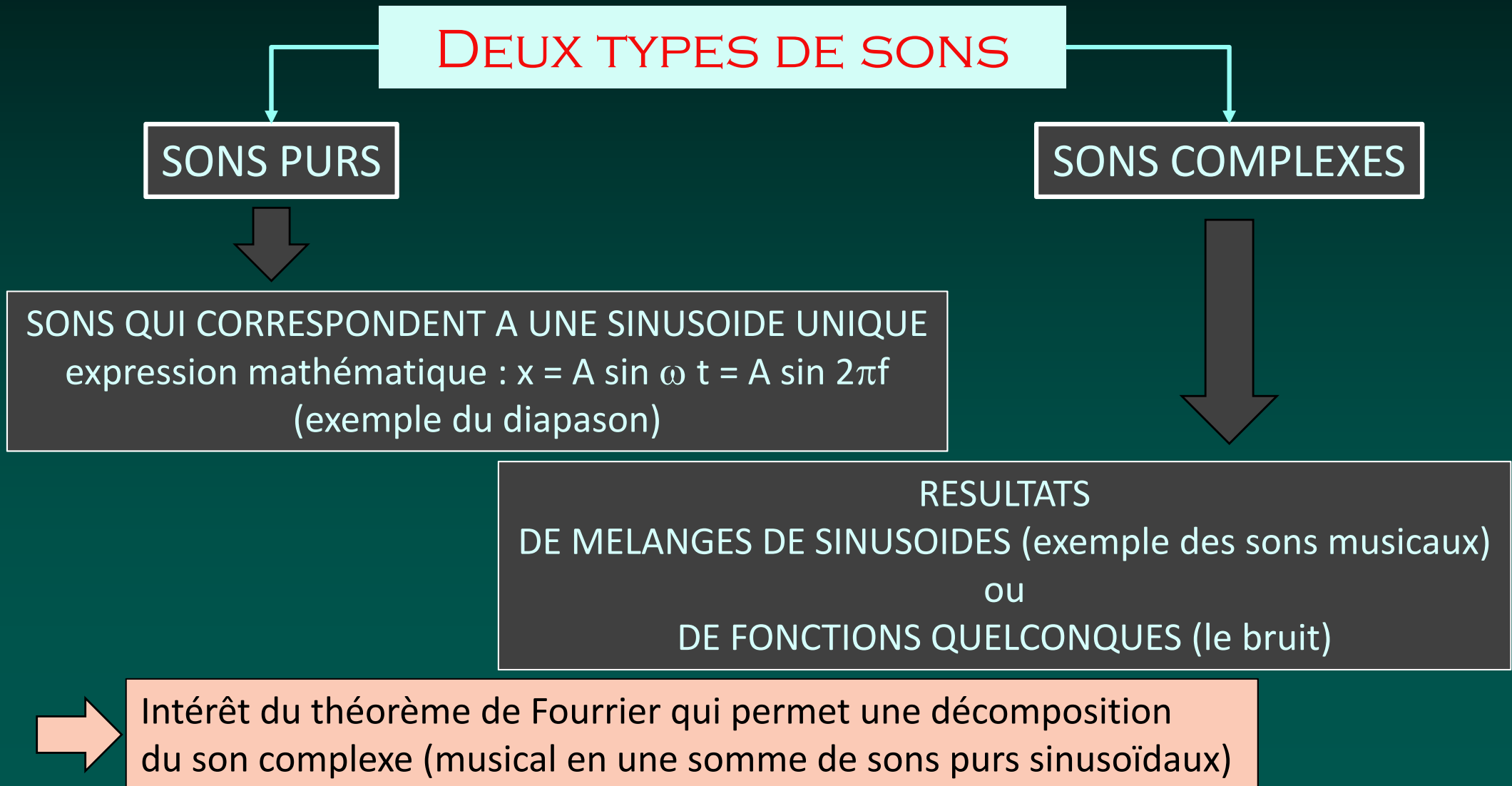
$W_0$  est définie comme l'intensité la plus faible pouvant être perçue par un sujet moyen (elle correspond à 0 dB)



$W_0 = \text{SEUIL D'AUDIBILITE}$

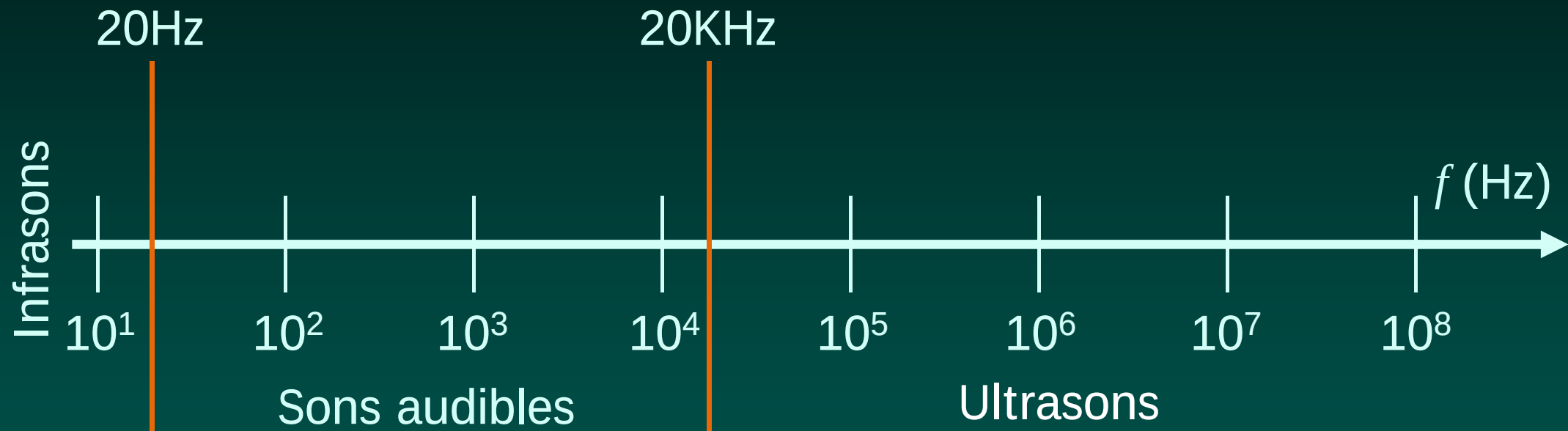
# III- Onde sonore : Classification des sons

## ➤ Classification qualitative (1)



# III- Onde sonore : Classification des sons

## ➤ Classification qualitative (2)

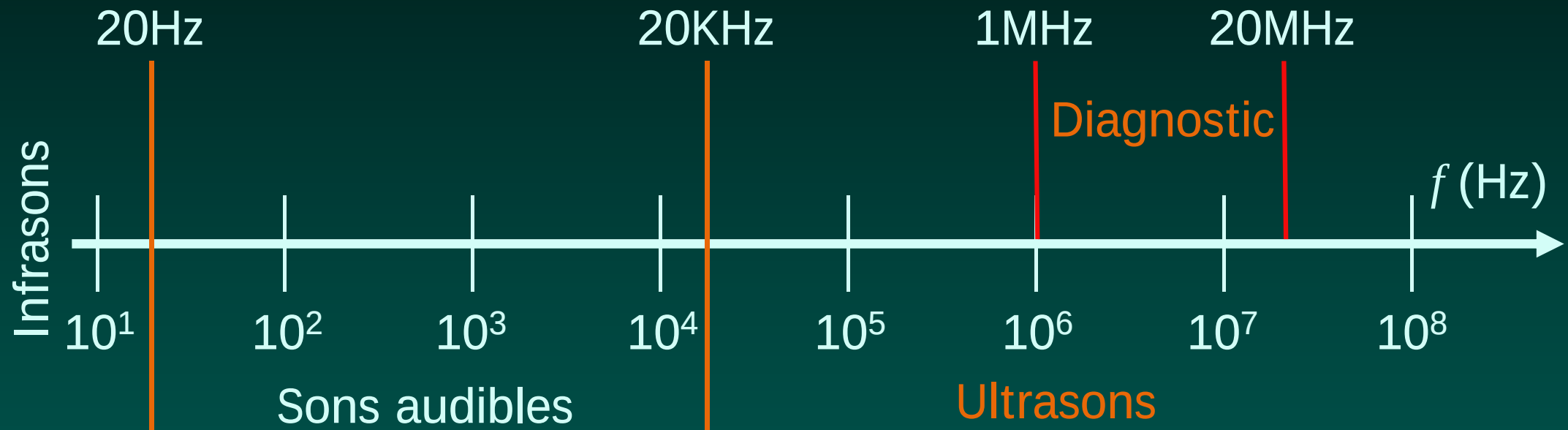


Remarque : pas de rigueur absolue sur les valeurs qui indiquent ces frontières :  
exemple de 16 Hz plutôt que 20 Hz dans certains ouvrages

# Une onde ultrasonore ?

# IV- Ultrasons (1)

## CLASSIFICATION DES ONDES SONORES



UNE ONDE ULTRASONORE :  
UNE ONDE SONORE DE FRÉQUENCE  $f$  ÉLEVÉE

# IV- Ultrasons (2)

## ➤ Fréquence $f$ - Longueur d'onde $\lambda$

| Milieu      | Masse vol.<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | Célérité $c$<br>(m/s) |
|-------------|------------------------------------|-----------------------|
| Air         | 1,2                                | 330                   |
| Poumon      | 300                                | 600                   |
| Eau         | 1000                               | 1480                  |
| Tissus mous | 1050                               | 1540                  |
| Rein        | 1041                               | 1565                  |
| Sang        | 1058                               | 1560                  |
| Muscle      | 1068                               | 1600                  |
| Os Crâne    | 1912                               | 4080                  |
| PZT         | 7500                               | 4000                  |

| Milieu      | $f$ (MHz) | $\lambda$ (mm) |
|-------------|-----------|----------------|
| Air         | 1         | 0,33           |
| Eau         | 1         | 1,48           |
| Tissus mous | 1         | 1,54           |
| Os crâne    | 1         | 4,08           |

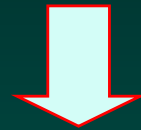
| $f$       | Son<br>1KHz | Ultrasons |          |
|-----------|-------------|-----------|----------|
|           |             | 1MHz      | 10MHz    |
| $\lambda$ | 1,54 m      | 1,54 mm   | 0,154 mm |

LE CHOIX DE LA FRÉQUENCE  $f$  DÉPENDRA DU TISSU À ÉTUDIER

# IV- Ultrasons (3)

## ➤ Directivité des Ultrasons

LA PROPAGATION DES ULTRASONS  
PRÉSENTE UN DEGRÉ DE DIRECTIVITÉ



DANS UN MILIEU HOMOGÈNE (EN L'ABSENCE D'OBSTACLES)  
LES ULTRASONS SE PROPAGENT EN LIGNE DROITE

DANS LE CADRE DU DIAGNOSTIC MÉDICAL  
DIRECTIVITÉ DES ULTRASONS : PROPRIÉTÉ ESSENTIELLE  
POUR LA DÉTECTION OU LA LOCALISATION D'OBSTACLES

# IV- Ultrasons (4)

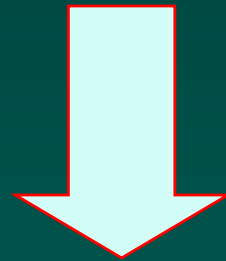
## ➤ Directivité des Ultrasons

- Exemple d'une source plane, circulaire et de diamètre D
  - Le faisceau ultrasonore est d'intensité I maximale dans l'axe de la source

- L'ouverture  $\theta$  est égale à :

$$\theta \approx \frac{2 \cdot \lambda}{D}$$

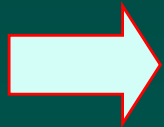
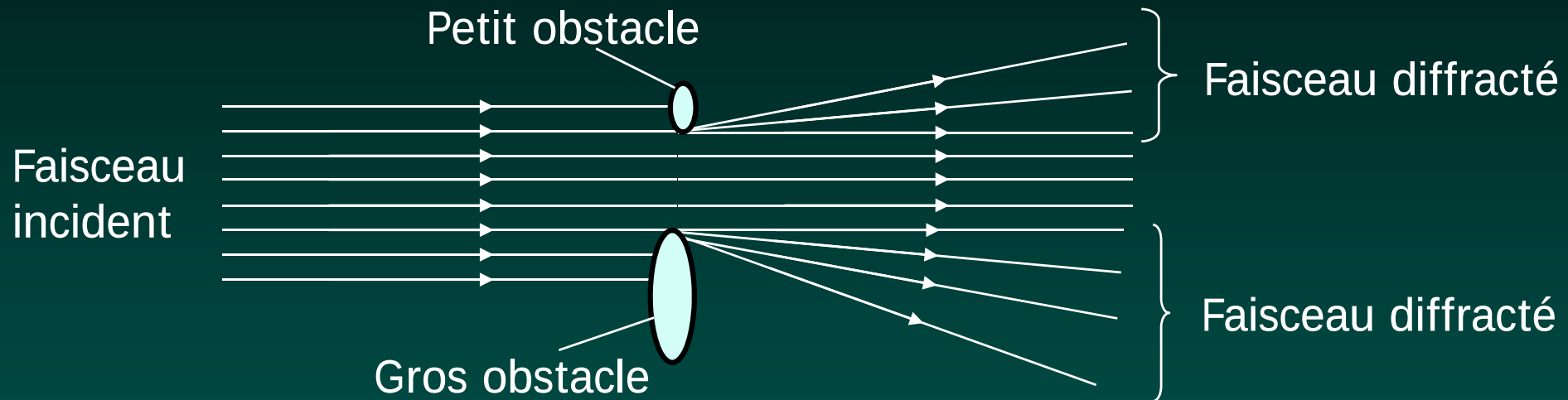
$\lambda$ : longueur d'onde ultrasonore  
dans le milieu considéré



LA DIRECTIVITÉ EST D'AUTANT PLUS GRANDE QUE LA  
FRÉQUENCE EST PLUS ÉLEVÉE

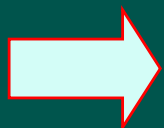
# IV- Ultrasons (5)

## ➤ Phénomène de Diffraction



LA DIFFRACTION EST D'AUTANT PLUS FAIBLE QUE LA  
FRÉQUENCE EST ÉLEVÉE

(ET QUE LA DIMENSION DE L'OBSTACLE EST GRANDE)



DIMINUER L'INFLUENCE RELATIVE DE LA DIFFRACTION :  
AUGMENTER LA TAILLE DES SONDES

# Interactions Ultrasons – milieux ?

# V- Interactions Ultrasons – milieux (1)

## ➤ Impédance acoustique $Z$

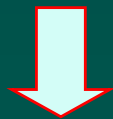
- Caractérise le milieu dans lequel se propage l'onde ultrasonore
- Dépend de la nature du milieu (masse volumique) et de la célérité de l'onde

$$Z = \rho \cdot c$$

$\rho$  : masse volumique du fluide

$c$  : célérité de l'onde dans le milieu considéré

IMPÉDANCE ACOUSTIQUE  $Z$



RÉSISTANCE DES TISSUS AU PASSAGE DE L'ONDE ULTRASONORE

## Exemples d'Impédances acoustiques

| Milieu      | $Z$ (kg/m <sup>2</sup> .s) |
|-------------|----------------------------|
| Air         | 0,0004                     |
| Poumon      | 0,26                       |
| Eau         | 1,5                        |
| Tissus mous | 1,3 – 1,7                  |
| Squelette   | 3,8 – 7,4                  |

# V- Interactions Ultrasons – milieux (2)

## MÉCANISMES RESPONSABLES DE L'ATTÉNUATION DU FAISCEAU ULTRASONORE

➤ Réflexion + Réfraction

➤ Diffusion

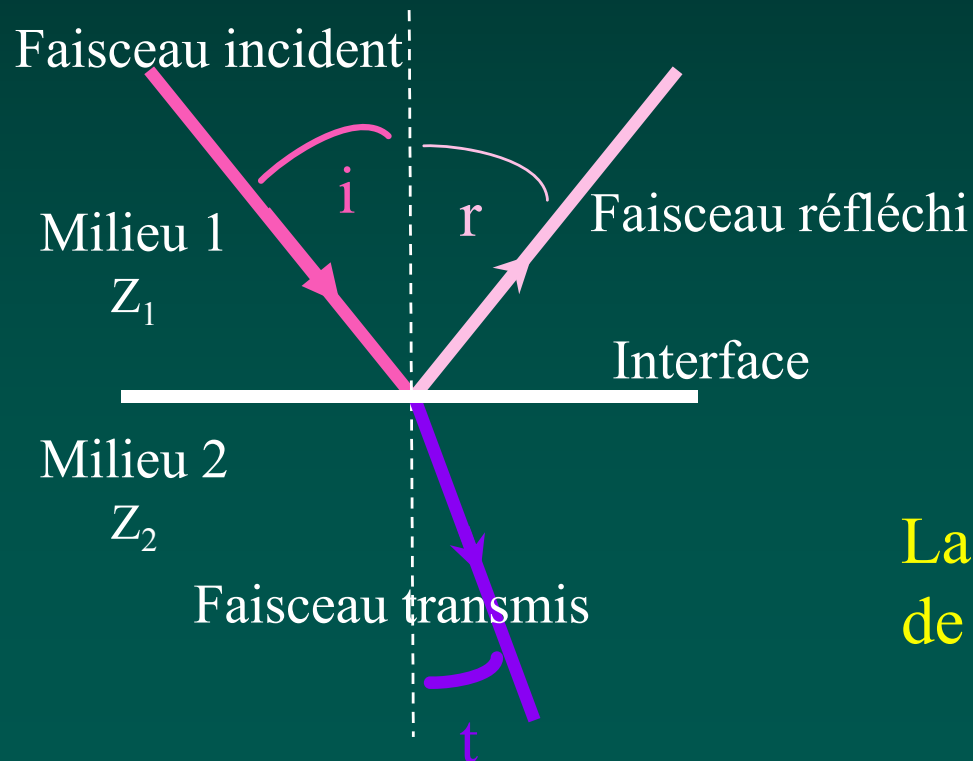
➤ Absorption

Tenant compte des phénomènes de Diffraction

# V- Interactions Ultrasons – milieux (3)

## ➤ Réflexion et réfraction

- Directivité du faisceau ultrasonore
- Aux interfaces entre tissus d'impédances différentes, le faisceau ultrasonore issu du milieu 1 est transmis dans le milieu 2 et/ou réfléchi vers le milieu 1



La déviation de la direction de propagation de l'onde ultrasonore est source d'artéfacts dans l'image échographique

# V- Interactions Ultrasons – milieux (5)

## ➤ Réflexion et réfraction

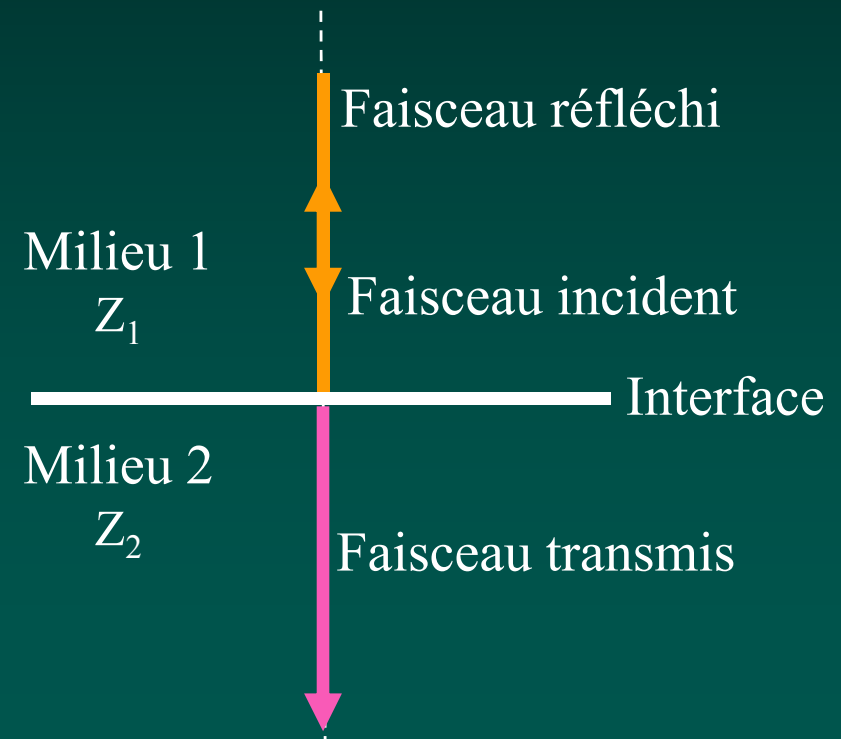
- Situation idéale : incidence nulle ( $i = 0^\circ$ )

➡ Le faisceau transmis n'est pas dévié ( $t = 0^\circ$ )

Expression des coefficients  
de Réflexion et de Transmission

$$R = \frac{W_R}{W_T} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

$$T = \frac{W_T}{W_I} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$



# V- Interactions Ultrasons – milieux (6)

## ➤ Réflexion et réfraction

### Exemples

| Interface       | Coefficient de réflexion R ( $i=0^\circ$ ) |
|-----------------|--------------------------------------------|
| Muscle – Sang   | 0,03                                       |
| Muscle – Foie   | 0,03                                       |
| Gras – Muscle   | 0,01                                       |
| Gras – Sang     | 0,08                                       |
| Gras – Foie     | 0,1                                        |
| Gras – Os       | 0,69                                       |
| Tissu mou – PZT | 0,89                                       |
| Tissu mou – Air | 0,99                                       |

Nécessité d'utiliser  
un gel de contact

$$R + T = 1$$

$$T = 0,01$$

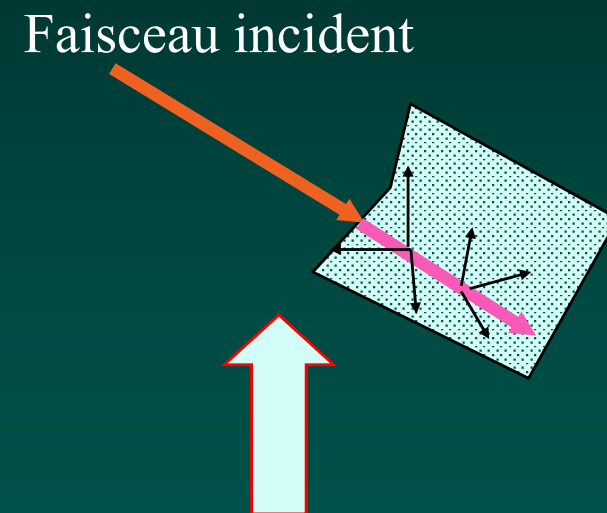
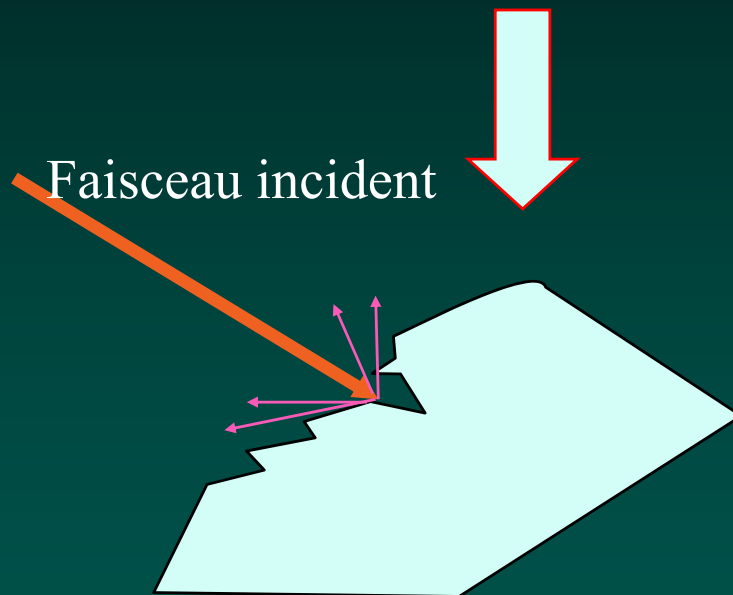


PLUS LA DIFFÉRENCE D'IMPÉDANCE SERA IMPORTANTE  
PLUS LA PART DE RÉFLEXION (R) SERA ÉLEVÉE

# V- Interactions Ultrasons – milieux (7)

## ➤ Diffusion (ou Dispersion)

- Diffusion sur les surfaces rugueuses des structures biologiques



- Réflexion (non spéculaire) sur des éléments de dimension de l'ordre de grandeur de l'onde ultrasonore

# V- Interactions Ultrasons – milieux (9)

## ➤ Absorption : Coefficients d'atténuation

| Milieu | Coefficients d'atténuation<br>(dB/cm) |
|--------|---------------------------------------|
| Sang   | 0,18                                  |
| Gras   | 0,6                                   |
| Os     | 20                                    |
| Poumon | 40                                    |
| Eau    | 0,0022                                |

Forte atténuation

Faible atténuation

HAUTE FRÉQUENCE : BONNE RÉOLUTION MAIS FAIBLE PÉNÉTRATION  
QUASIMPOSSIBILITÉ D'OBTENIR UNE IMAGE PULMONAIRE

# V- Interactions Ultrasons – milieux (8)

## ➤ Absorption

- Conversion de l'énergie ultrasonore en chaleur
- Hypothèse : Milieu homogène et isotrope



$$P(x) = P_0 e^{(-\alpha x)}$$

$P(x)$  : Expression de la pression (unidimensionnel)

$\alpha$  : Coefficient d'atténuation

$P_0$  : Expression de la pression à l'interface

DANS LES TISSUS BIOLOGIQUES

$\alpha$  varie de 0,5 à 3,5 dB/cm.Mhz

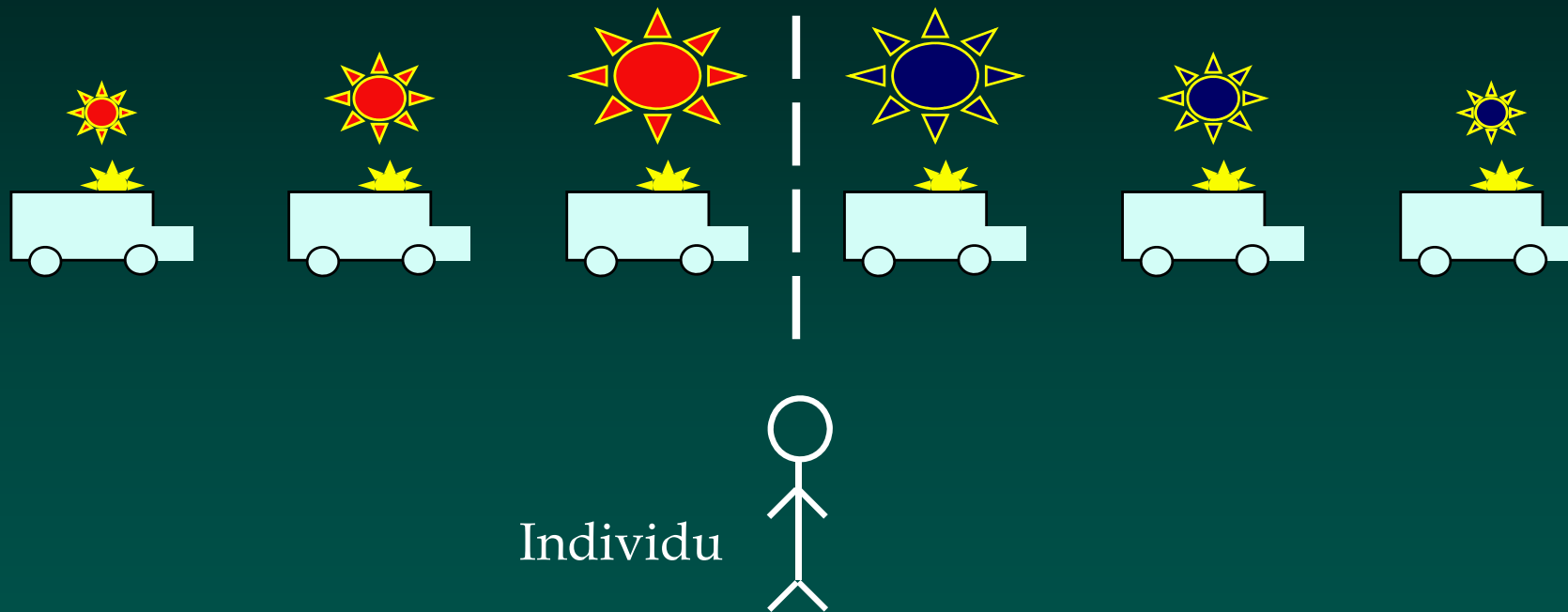


$\alpha$  DÉPEND DE LA FRÉQUENCE DE L'ONDE ULTRASONORE  
 $\alpha$  AUGMENTE AVEC LA FRÉQUENCE

# Effet Doppler ?

# VI- Effet Doppler (1)

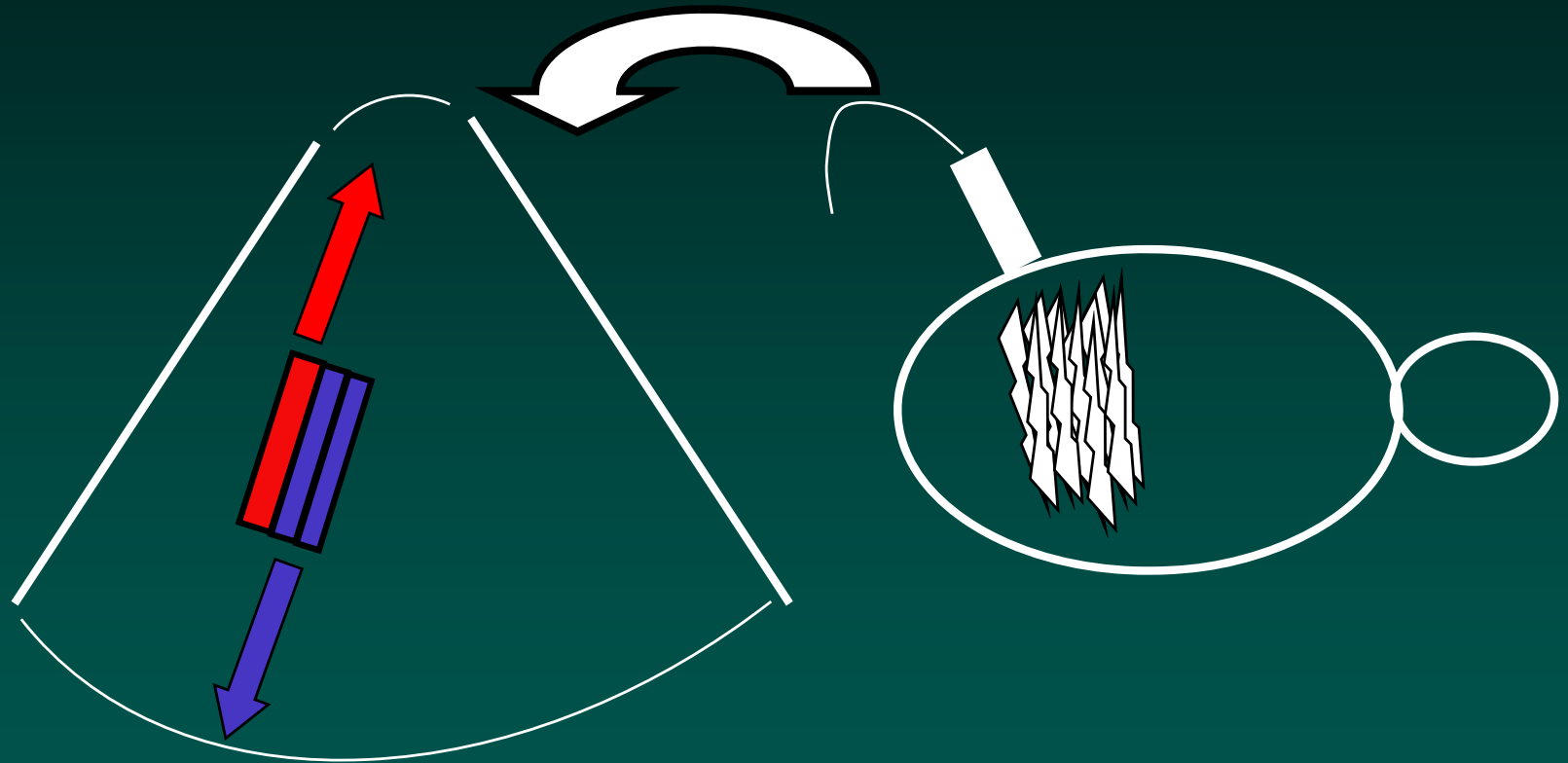
EXEMPLE D'UN VÉHICULE (SOURCE) EN MOUVEMENT



LORSQUE LA SIRÈNE S'APPROCHE, LE SON SEMBLE PLUS AIGU  
LORSQUE LA SIRÈNE S'ÉLOIGNE, LE SON SEMBLE PLUS GRAVE

# VI- Effet Doppler (2)

## VISUALISATION SCHÉMATIQUE DU CORDON OMBILICAL



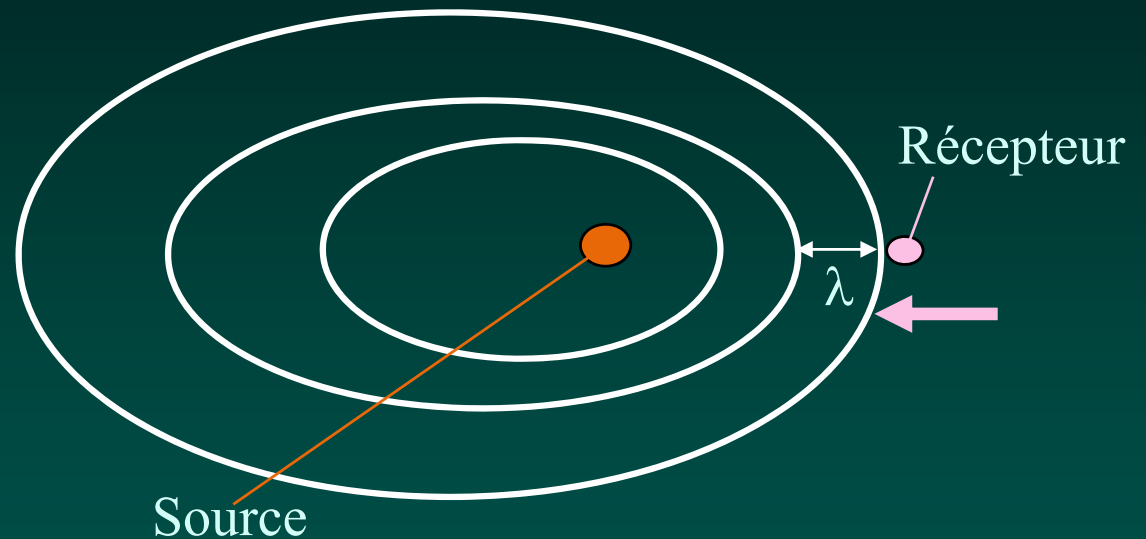
LE CORDON OMBILICAL : UNE VEINE ET DEUX ARTÈRES  
LES COULEURS : CONVENTION ET RIEN D'AUTRE

# VI- Effet Doppler (3)

- Récepteur (r) en mouvement vers la source (à une vitesse  $v_r$ )
- Source (s) stationnaire

$$\lambda_r = \lambda_s - \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \frac{v_r}{f_r}$$



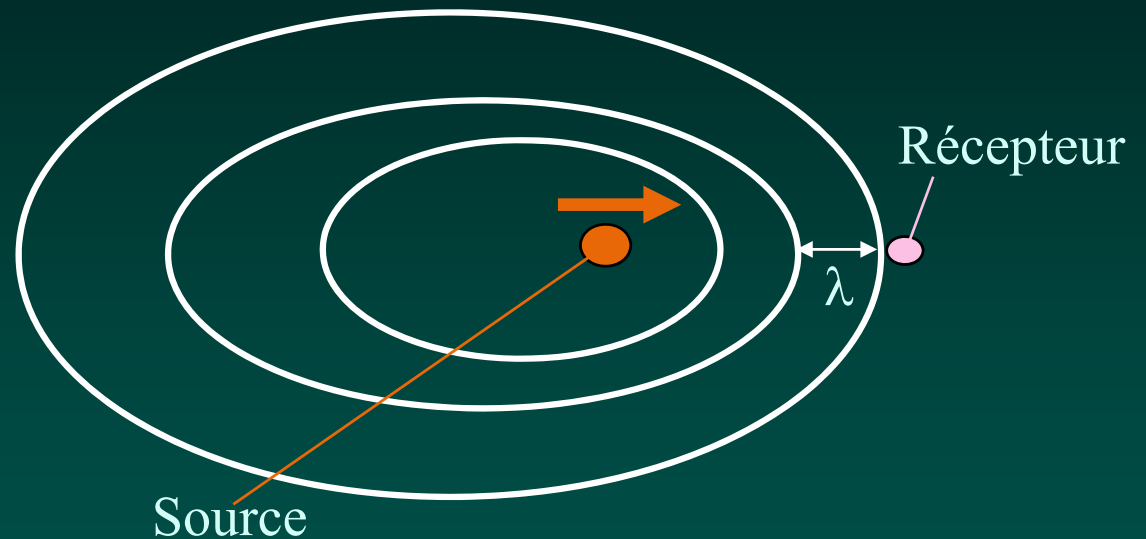
$\Delta\lambda$  = distance parcourue par le récepteur en une période T

# VI- Effet Doppler (4)

- Récepteur (r) stationnaire
- Source (s) en mouvement vers le récepteur (à une vitesse  $v_s$ )

$$\lambda_r = \lambda_s - \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \frac{v_s}{f_s}$$

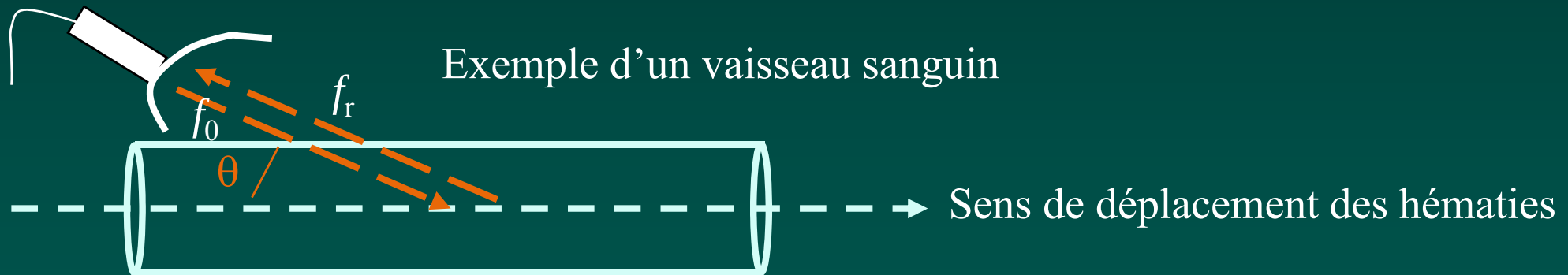


$\Delta\lambda$  = distance parcourue par la source en une période T

# VI- Effet Doppler (5)

## ➤ Application médicale

- Les ultrasons « percutent » les hématies en mouvement → Diffusion
- Effet Doppler intervient 2 fois :
  - de la sonde (émetteur fixe) vers les hématies (récepteurs en mouvement)
  - des hématies (émetteurs en mouvement) vers la sonde (récepteur fixe)



$$v = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f_0 \cdot \cos(\theta)}$$

$v$  : vitesse des hématies  
 $c$  : célérité des ultrasons

# IMAGERIE ULTRASONORE

## OUTIL ÉCHOGRAPHIQUE

OUTIL ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

RECUEIL, TRAITEMENT, VISUALISATION

## MODES D'IMAGERIE

MODE A, MODE B, MODE TM, VÉLOCIMÉTRIE DOPPLER

## PARAMÈTRES DE RÉGLAGE

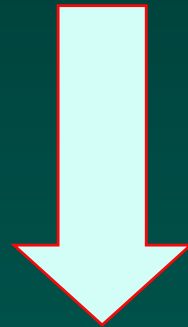
RÉSOLUTION, FOCALISATION ET TRAITEMENT DU SIGNAL

# Un échographe ?

# I- Échographe (1)

APPAREIL À VOCATION DIAGNOSTIQUE  
(VISUALISATION NON INVASIVE ET ATRAUMATIQUE)

FONDÉ SUR LA RÉCEPTION DES ÉCHOS ULTRASONORES  
RENNVOYÉS PAR LES SURFACES DE DISCONTINUITÉ D'IMPÉDANCES  
SITUÉES DANS LES TISSUS



CONSTRUCTION DE L'IMAGE ÉCHOGRAPHIQUE  
IDENTIFIER, LOCALISER ET CARACTÉRISER L'INTERFACE

# I- Échographe (2)

SONDE ULTRASONORE  
(PRODUCTION ET DÉTECTION DES ULTRASONS)



CONVERSION ET AMPLIFICATION DU SIGNAL  
(CONVERSION SIGNAL ANALOGIQUE - DIGITAL)  
(AMPLIFICATION DU SIGNAL DIGITAL)



TRAITEMENT DU SIGNAL  
(COMPENSATION DE GAIN)  
(COMPRESSION LOGARITHMIQUE)  
(SEUILLAGE)



FORMATION DE L'IMAGE

# I- Échographe (3)

## ➤ Principe général de fonctionnement

Excitation électrique



Émission d'une onde de fréquence  $f$  ( $t = 0$ )

Par la sonde ultrasonore



Réflexion partielle du signal ultrasonore ( $t = \Delta t_1$ )  
par un obstacle situé à une distance  $d$  de l'émetteur



Réception du signal réfléchi ( $t = \Delta t_2$ )  
par la sonde ultrasonore

$$c_{\text{milieu}} = \frac{d}{\Delta t_1}$$

$$c_{\text{milieu}} = \frac{2 \cdot d}{\Delta t_2}$$

**C ET  $\Delta t_2$  CONNUS**



**DÉTERMINATION DE LA DISTANCE  $d$**

# I- Échographe (4)

## ➤ Principe général de fonctionnement

- Émission pulsée d'ondes ultrasonores à intervalles  $T_0$

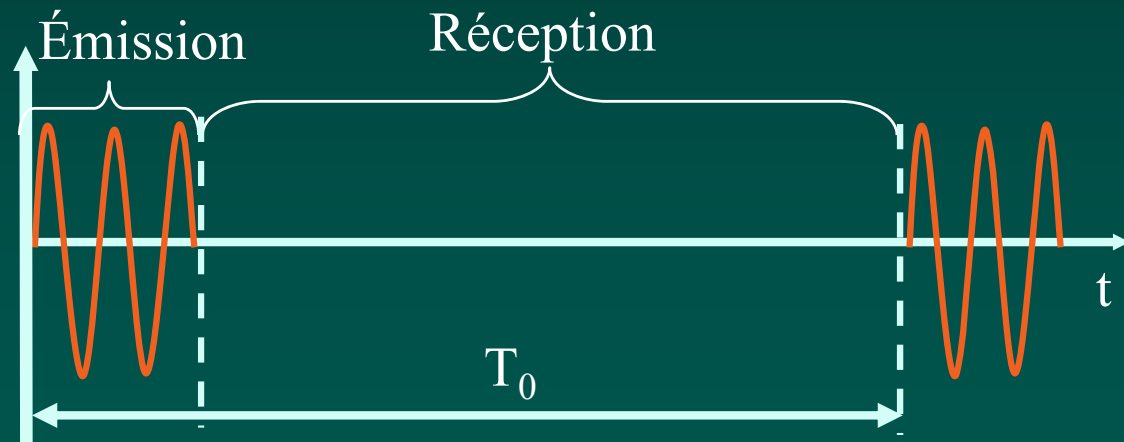
➡ Pas d'interférences entre l'onde émise et l'onde réfléchie

Avec

$$T_0 \geq \tau$$

Tel que

$$\tau = \frac{2d}{c}$$



# La sonde ultrasonore ?

# II- Sonde ultrasonore (1)

UNE SONDE ULTRASONORE  
UN ÉMETTEUR ET UN RÉCEPTEUR D'ULTRASONS

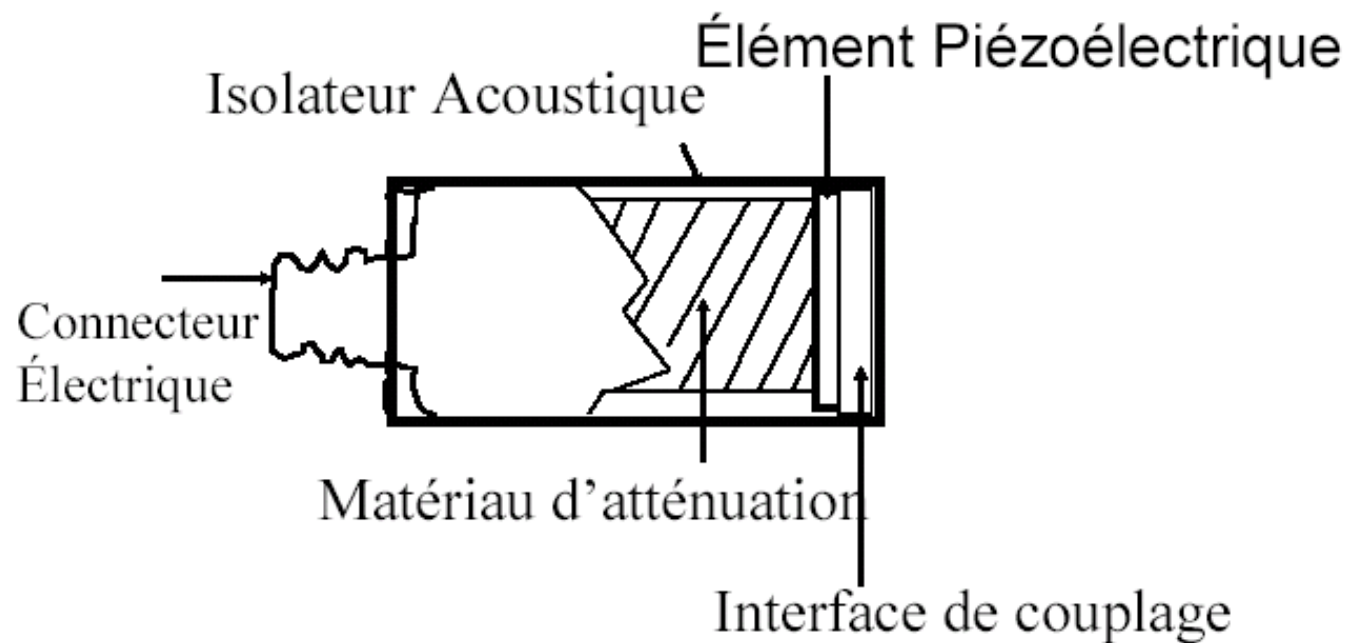


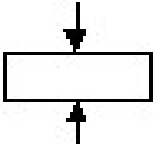
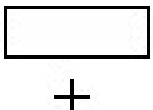
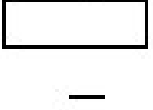
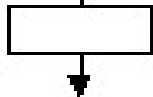
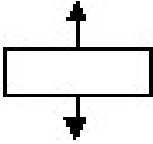
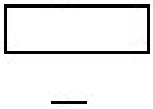
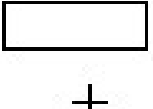
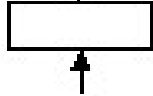
Schéma simplifié d'une sonde ultrasonore

## II- Sonde ultrasonore (2)

### ➤ Éléments piézoélectriques

Effet direct : Polarisation électrique sous l'action d'une contrainte mécanique

Effet inverse : Possibilité de se déformer sous l'action d'un champ électrique

| Cause                                                                               | Effet                                                                                         |  | Cause                                                                                           | Effet                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | -<br><br>+   |  | +<br><br>-   | Déplacement ↑<br>   |
|  | +<br><br>- |  | -<br><br>+ | Déplacement ↓<br> |
| Effet direct                                                                        |                                                                                               |  | Effet inverse                                                                                   |                                                                                                        |

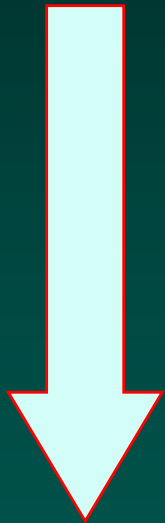
Principes de la piézo-électricité

RÉVERSIBILITÉ EN TERMES DE COMPORTEMENT (ÉMISSION ET RÉCEPTION)

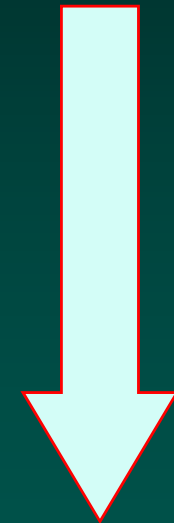
## II- Sonde ultrasonore (3)

### ➤ Qualité des éléments piézoélectriques

Matériau naturel (quartz)



Coefficients piézoélectriques bien supérieurs  
Impédances acoustiques plus faibles  
Bande de fréquence de résonance plus large  
Conception plus large des formes de capteurs



Matériau artificielle (PZT, Polymères)

# Modes d'Imagerie ultrasonore ?

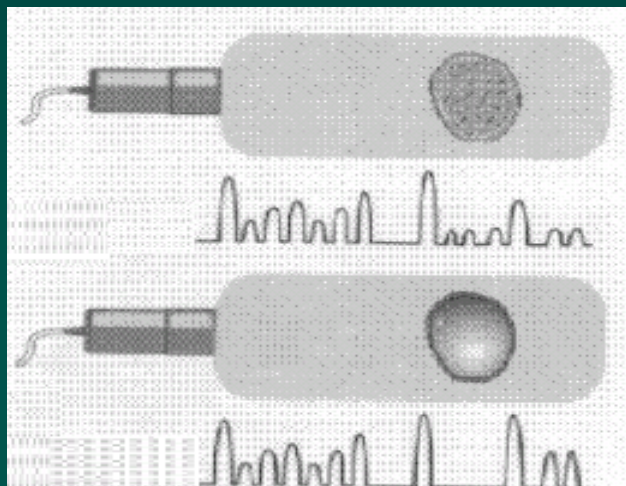
# V- Mode d'Imagerie (1) : Échographie Mode A

## ➤ Principe de fonctionnement

- 1- Émission d'une impulsion ultrasonore (à  $t = 0$ )
- 2- Une fraction de l'énergie est réfléchiée à l'interface entre deux milieux 1 et 2 (caractérisée par la discontinuité d'impédance  $Z_1$  et  $Z_2$ )
- 3- L'écho permet alors de déterminer la distance  $d$  (sonde – interface) (de retour sur le transducteur, cette impulsion y engendre une impulsion électrique)

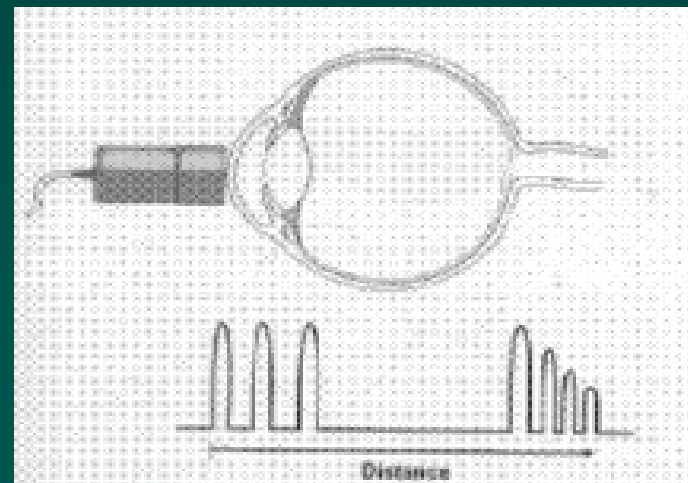
### Exemple (a) : Type de structure

Echogénic



Anéchoic

### Exemple (b) : examen de l'oeil



# V- Mode d'Imagerie (2) : Échographie Mode A

## ➤ Informations délivrées

- Distance entre les interfaces (objets ou structures) et la sonde
- Amplitude relative des échos ultrasonores
- Type de structures : echogenic ou anechoic

## ➤ Caractéristiques

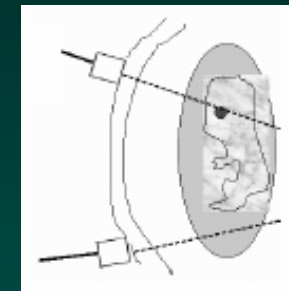
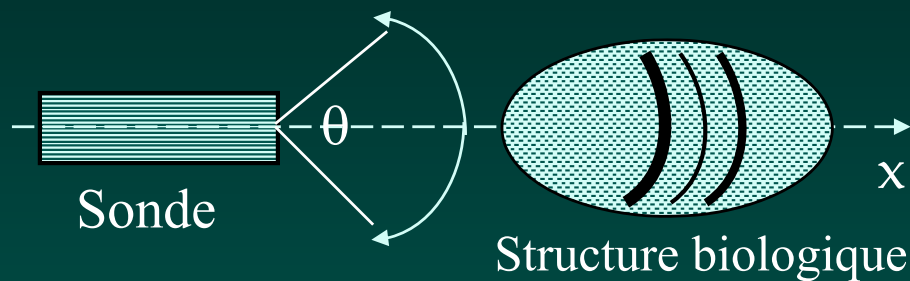
- Mesures de la dimension des objets ou structures
- Information unidimensionnelle
- Pas d'enregistrement du mouvement

**MODE A : MODE SCAN EN AMPLITUDE**

# V- Mode d'Imagerie (3) : Échographie Mode B

## ➤ Principe de fonctionnement

- Représentation des différents échos sous forme de points brillants  
(Brillance = fonction du coefficient de réflexion  $R$ )



Exemple

## ➤ Types d'échographie Mode B

### 1- Mode B Statique

Déplacement de la sonde suivant une ligne directrice pour caractériser l'image écho.

### 2- Mode B en temps réel : échographie dynamique

Techniques de focalisation pour permettre des cadences d'images suffisantes

# V- Mode d'Imagerie (4) : Échographie Mode B

## ➤ Caractéristiques du Mode B statique

- Visualisation de coupes anatomiques
- Visualisation du mouvement en 2D
- Résolution temporelle limitée par le débit d'images

## ➤ Caractéristiques du Mode B dynamique

- Informations précises sur la dimension des structures
- Excellente résolution temporelle
- Informations précises sur le mouvement des réflecteurs

**MODE B : MODE SCAN EN INTENSITÉ**

# V- Mode d'Imagerie (5) : Échographie Mode TM

## ➤ Principe de fonctionnement

- 1- Principe dérivé de l'échographie B
- 2- Représentation du mouvement des structures échogènes

## ➤ Caractéristiques

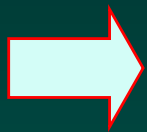
- 1- Détermination du mouvement des points caractérisant une structure échogène
- 2- Incapacité de délivrer l'image de la structure échogène

**Exemple d'application : cinétique ventriculaire**

# V- Mode d'Imagerie (6) : Effet Doppler

## ➤ Vélocimétrie Doppler

- Réflexion d'une onde ultrasonore par les globules rouges
- Modification de la fréquence de l'onde ultrasonore  
(liée à la vitesse de déplacement du sang par rapport à l'émetteur ou au récepteur)



La fréquence de l'onde rétro-diffusée est modifiée par rapport à l'onde incidente d'une quantité proportionnelle à la vitesse des hématies

## ➤ Types principaux de Vélocimétrie Doppler

### 1- Vélocimétrie à émission continue

Estimation de la vitesse d'écoulement sanguin

### 2- Vélocimétrie à émission pulsée (notion de portes électroniques)

Reconstitution du profil des vitesses

# V- Mode d'Imagerie (7) : Effet Doppler

## ➤ Caractéristiques Vélodimétrie Doppler continue

- Une sonde (deux transducteurs (A et B) : A = émission – B = réception
- Mesure des flux moyens de vitesse

## ➤ Caractéristiques Vélodimétrie pulsée

- Une sonde : émission et réception (principe de l'échographie)
- Détermination des profils de vitesse

# Une Bonne Image : Exercice du Compromis

Utilisation de sondes de petites tailles → Phénomènes de diffraction

Fréquences élevées → Absorption importante du signal ultrasonore

Fréquences élevées → Difficultés de détecter des éléments peu échogènes

EN PRATIQUE

ADAPTER LA SONDE ET LA FRÉQUENCE À LA NATURE DE L'EXAMEN

POUR AMÉLIORER LA RÉOLUTION SPATIALE



FOCALISATION DES FAISCEAUX ULTRASONORES

# Résolution du signal et Focalisation ?

# III- Résolution du signal et Focalisation (1)

## ➤ Résolution spatiale

Contrainte par le volume de la pulsation acoustique

- Axiale :  $\frac{1}{2}$  longueur de pulse : (Nbre de cycles par pulse) .  $\lambda$

Amélioration par :

- Haute fréquence, Atténuation

- Latérale : Diamètre du faisceau

(Optimisation à la transition entre champs lointain et proche)

Amélioration par :

- Utilisation d'une lentille de focalisation

## ➤ Résolution temporelle

$$T_0 \geq \tau$$

Avec

$$\tau = \frac{2d}{c}$$

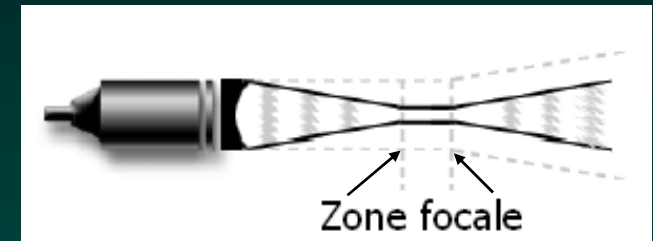
ÉVITER LES PHÉNOMÈNES D'INTERFÉRENCE

# III- Résolution du signal et Focalisation (2)

## ➤ Focalisation du faisceau ultrasonore

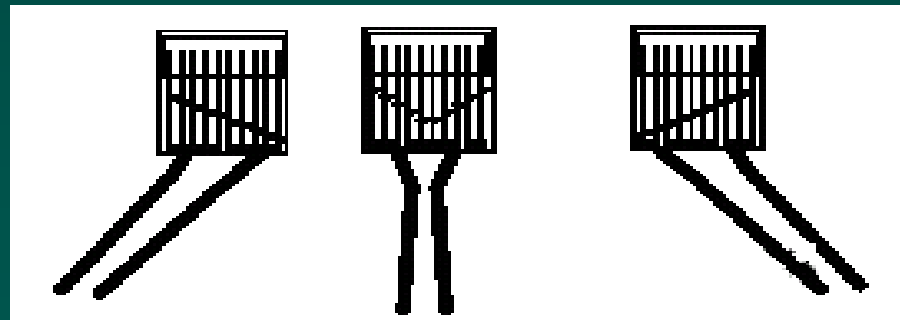
### ■ Focalisation mécanique : (lentille ou sonde concave)

- Dépend de la fréquence
- Dépend de la taille de l'élément PZT



### ■ Focalisation électronique :

- Matrice d'éléments PZT pour générer un faisceau large et focalisé
- Décalage temporel entre les éléments PZT pour diriger le faisceau



# Paramètres de réglage et artéfacts ?

# IV- Artéfacts (2) : Pourquoi ?

## MODÈLE THÉORIQUE FONDÉ SUR CERTAINES HYPOTHÈSES

- L'onde ultrasonore est plane et sans diffraction
- La vitesse de propagation  $c$  est uniforme et constante
- Le coefficient d'atténuation des matériaux biologiques est uniforme
- Le corps est constitué d'un ensemble isotropique de sources spéculaires

# Effets biologiques et sécurité ?

# VII- Effets biologiques et Sûreté

## ➤ Effets Biologiques

- Mécanique : Phénomène de Cavitation
- Thermique : Phénomène d'absorption sous forme calorifique

## ➤ Sûreté

- Innocuité des ondes ultrasonores

Pas de corrélation certaine entre l'utilisation des Ultrasons et des effets négatifs sur la structure biologique (dans le cadre du diagnostic)

- Codes de sûreté édictés